

# データ解析によるコンクリートの圧縮強度の 推定方法に関する研究

## STUDIES ON ESTIMATING METHOD OF COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE BASED ON DATA ANALYSES

豊 福 俊 泰\*

By Toshiyasu TOYOFUKU

The main purpose of this study is to suggest an efficient method for quality control of concrete. In terms of the mix design, the estimating method of compressive strength of concrete is investigated at the stage that mix proportion conditions of production conditions in the materials to be used, batching, mixing and transportation are known (at the stage before mixing or that of fresh concrete).

Through a lot of data analyses of investigation results of concrete tests, it became evident that compressive strength of concrete is greatly influenced by unit cement content, unit water content and other factors. And the estimation equations of compressive strength of concrete were proposed.

*Keywords*: quality control, mix design, compressive strength, mix proportion, water cement ratio, unit cement content, aggregate, multiple regression analysis, ready-mixed concrete

### 1. 序 論

わが国の建設工事におけるコンクリートの品質管理は、一般に荷おろし箇所採取した供試体の材令28日における圧縮強度によって行われている。しかし、この試験結果が判明した時点には、コンクリート工事が進捗しており、工程の管理や処置にこのデータが役立ちにくいのが現状である。この問題点を解決するためには、上流で確実に管理するいわゆる川上管理が重要であり、強度への影響が大きい管理項目、すなわちセメントや骨材などの材料管理、計量や練りませなどの製造管理、運搬や打込みなどの施工管理に着目して、品質管理を行う必要がある<sup>1)</sup>。ところが、骨材やフレッシュコンクリート等の管理試験データから、コンクリートの圧縮強度を定量的に推定する方法が確立しておらず、的確な品質管理の実施が困難であるのが現状である<sup>2)</sup>。

圧縮強度の推定方法としては、コンクリートの配合理論の展開とともに多数の提案がされてきたが、主要な理論は、Abramsの水セメント比説<sup>3)</sup>、Talbotのセメント空隙比説<sup>4)</sup>、Lyseのセメント水比説<sup>5)</sup>等である<sup>6)</sup>など。わ

が国では、土木学会コンクリート標準示方書<sup>7)</sup>で、Lyseのセメント水比説を継承し、圧縮強度をセメント水比との単回帰分析から推定する方法が示されており、これが一般に用いられている。また、山崎、神田らによるセメント空隙比の研究<sup>8),9)</sup>、穂積による重回帰式の研究<sup>10)</sup>等が展開されてきた。しかし、圧縮強度は、セメント水比だけではなく、材料、配合、試験条件など多数の要因によって左右され、これらを説明して完全かつ簡潔に強度を推定する方法は、これまで研究されていない。

このような現状に鑑み、著者は、「重回帰分析によるコンクリートの品質管理システム」を提言するとともに<sup>11)</sup>など、品質管理がコンクリートの品質に及ぼす影響を指摘した<sup>12)</sup>など。本文は、これらの研究を継続し、コンクリートの配合設計において、練りませ前またはフレッシュコンクリートの段階で圧縮強度を推定する手法を確立するため、解析データを全国規模で集計するとともに解析プログラムに改良を加え、圧縮強度と材料・配合・製造条件等との関係を、単回帰分析および重回帰分析によって集大成したものである。

### 2. 解析方法

#### (1) 特性要因および解析データ

コンクリートの圧縮強度に及ぼす特性要因としては、

\* 正会員 工博 日本道路公団大阪管理局技術部調査役  
(前・同試験所コンクリート試験室室長)  
(〒565 吹田市清水15-1)

表-1 変数とした項目および解析データ

項目注1)	区分	記号	単位	実測値から計算する計算方法	解析データ					
					調査Ⅰ	調査Ⅱ				
Y	配合設計時の圧縮強度 (材令28日)	$f'_{c28}$	kgf/cm <sup>2</sup>		85~708	203~619				
X <sub>1</sub>	配合・製造条件	配合	骨材率	s/a	%	$s/a = (S_0/S_H) / \{(S_0/S_H) + (G_0/G_H)\}$	23.8~56.1	32.0~53.0		
			単位水量	W	kg/m <sup>3</sup>	$W = W_0/V$	114~216	129~196		
			単位セメント量	C	kg/m <sup>3</sup>	$C = C_0/V$	197~517	222~465		
			単位細骨材量	S	kg/m <sup>3</sup>	$S = S_0/V$	433~1009	536~963		
			単位粗骨材量	G	kg/m <sup>3</sup>	$G = G_0/V$	773~1416	844~1353		
			Δ単位湿和剤量	AW	kg/m <sup>3</sup>	—	—	—		
			水セメント比	W/C	%	$W/C = 100 \cdot (W_0/C_0)$	31.5~99.0	35.2~74.4		
			セメント水比	C/W	%	$C/W = C_0/W_0$	1.01~3.18	1.34~2.84		
			セメント空隙比	c/v	%	$c/v = (C/C_H) / (W+10A)$	0.260~0.768	0.339~0.725		
			全吸水率	W <sub>a</sub>	kg/m <sup>3</sup>	$W_a = S \times S_0 / (100+S_0) + G \times G_0 / (100+G_0)$	11.7~87.2	7.9~55.0		
			全水率	W <sub>T</sub>	kg/m <sup>3</sup>	$W_T = W + W_a$	135~253	139~234		
			全水セメント比	W <sub>T</sub> /C	%	$W_T/C = 100 \cdot (W + W_a) / C$	37.3~112.9	40.5~89.7		
			セメント全水比	C/W <sub>T</sub>	%	$C/W_T = C / (W + W_a)$	0.89~2.68	1.11~2.47		
			単位容積質量	U	kg/m <sup>3</sup>	$W + C + S + G$	2128~2443	2219~2478		
			X <sub>1</sub>	製造	フレッシュコンクリート	スランプレット	SL	cm	$A = A_0$	1.1~20.2
空気量	A	%					0.6~6.9	2.9~5.8		
コンクリート温度	CO	°C					6.0~32.0	7.0~32.0		
X <sub>1</sub>	材料	骨材	Δ容積練りませ時間	V	m <sup>3</sup>	$V = \{(C_0/C_H) + W_0 + 10 \cdot A_0 + (S_0/S_H) + (G_0/G_H)\} / 1000$	—	—		
			セメント	比重	C <sub>H</sub>	—	$C_H = C_{H0}$	3.00~3.22	3.03~3.18	
				粉末度(ブレン値)	C <sub>F</sub>	cm <sup>2</sup> /g <sub>s</sub>		3000~4470	3020~4630	
X <sub>1</sub>	材料	骨材	圧縮強度(材令28日)	C <sub>c28</sub>	kgf/cm <sup>2</sup>		254~517	385~515		
			細骨材	0.15mmふるい通過量	S <sub>0.15</sub>	%	$S_0 = 100 \cdot (S_T \cdot (1 + S_0/100) / S_H)$	0~40.1	0~15.0	
				粗粒率	S <sub>M</sub>	%		1.97~3.75	2.06~3.21	
				洗い試験(失われ部)	S <sub>A</sub>	%		0~28.6	0~16.1	
				実積率	S <sub>G</sub>	%		56.1~80.5	59.2~72.7	
				単位容積質量	S <sub>T</sub>	kg/l		1,400~2,101	1,485~1,886	
				比重(表乾)	S <sub>H</sub>	—	$S_H = S_{H0}$	2.42~2.79	2.51~2.73	
				吸水率	S <sub>Q</sub>	%		0.78~6.63	0.02~3.71	
				粘土塊	S <sub>N</sub>	%		0~8.1	0~0.9	
				軟らかい石片	S <sub>U</sub>	%		0~8.8	0~1.3	
				比重1.950液体(浮く部)	S <sub>D</sub>	%		0.2~16.0	0~9.1	
				安定性						
				粗骨材	最大寸法	G <sub>M</sub>	mm		15~40	20~40
					粗粒率	G <sub>M</sub>	%		6.28~8.06	6.02~8.04
					洗い試験(失われ部)	G <sub>A</sub>	%		0~6.1	0~2.0
実積率	G <sub>0</sub>	%	$G_0 = 100 \cdot (G_T \cdot (1 + G_0/100) / G_H)$		54.5~74.9	55.8~69.8				
単位容積質量	G <sub>T</sub>	kg/l			1,390~1,930	1,493~1,864				
比重(表乾)	G <sub>H</sub>	—	$G_H = G_{H0}$		2.36~2.96	2.57~3.01				
吸水率	G <sub>Q</sub>	%			0.18~7.76	0.03~2.90				
粘土塊	G <sub>N</sub>	%			0~17.85	0~1.2				
軟らかい石片	G <sub>V</sub>	%			0~37.5	0~4.8				
比重1.950液体(浮く部)	G <sub>U</sub>	%			0~8.3	0~0.9				
安定性	G <sub>D</sub>	%			0~42.9	0~11.4				
すりへり減量	G <sub>S</sub>	%			1.4~33.1	0~26.3				
全骨材	平均吸水率	Q	%		$Q = S_a \cdot S / (S + G) + G_a \cdot G / (S + G)$	0.70~5.50	0.41~2.93			

注1) Y: 目的変数とした項目, X<sub>1</sub>: 説明変数とした項目, Δ: 他の項目の算出に用いる項目。  
 注2) W, C, S, G, A, C<sub>H</sub>, S<sub>H</sub>, G<sub>H</sub>の実測値をW<sub>0</sub>, C<sub>0</sub>, S<sub>0</sub>, G<sub>0</sub>, A<sub>0</sub>, C<sub>H0</sub>, S<sub>H0</sub>, G<sub>H0</sub>とする。試験方法は、JISの各試験方法による。

材料、配合、製造、気象条件、運搬、試験条件等多岐にわたる<sup>1), 11)</sup>など。本研究で採用したコンクリートの品質推定のための特性要因は、表-1に示す品質管理試験項目である。解析データの作成方法は、まずデータシートを作成しこれに各調査データを記入した後、日本道路公団(以後、公団とよぶ)試験所の大型電算機ACOS-650に入力した。次に、異常値のデータチェック後、各試験値から求められるW/C等の計算値の精度を統一するとともにここで定義した項目を計算するため、同表中に示す計算式でプログラム処理した変換値を、集計・解析した。

解析データとしては、文献12)で信頼性が確認されたコンクリート試験調査結果(調査Ⅰ)および公団の建設工事打設コンクリートの品質調査結果(調査Ⅱ)とした。調査Ⅰは、著者が行ったコンクリート試験結果のほか全国の公団各機関で行われた各種のコンクリート試験結果(昭和46~60年度に実施された70報告書の3076配合)である。表-1に示すように、データの分布範囲

(変域)が広く、良質骨材から低品質骨材までを用いた土木工用コンクリートを代表しているといえよう。

調査Ⅱは、昭和33~60年度竣工工事のうちから57~58年度竣工工事を抽出して解析データとしたが、表-1に示すように、骨材の品質規準におおむね適合する範囲を変域とする一般的な骨材使用データ(曲げ強度で管理される舗装用コンクリートおよび捨てコンを除外した1794配合)である。データの分布範囲は、実際に全国の土木(高速自動車道)工事で使用されているコンクリートの出現頻度の分布になっている。

(2) 演算方法

圧縮強度  $f'_{c28}$  と材料・配合・製造条件との関係は、単相関分析および重回帰分析で検討した。

a) 単回帰分析

説明変数が  $x_1$  のみで、これに対応する目的変数の値  $y_1$  が  $n$  組得られるとき、単回帰モデル  $Y = a + bX$  (ここで、 $a, b$  は定数) から、単回帰分析により表-2に示す16式を求めるプログラムを作成し、最適推定式を

表一 単回帰分析

回 帰 式			
$Y=a+bX$	(1)	$Y=(aX+b)/X$	(2)
$Y=a+b\log X$	(3)	$Y=(a\log X+b)/\log X$	(4)
$Y=1/(a+bX)$	(5)	$Y=X/(aX+b)$	(6)
$Y=1/(a+b\log X)$	(7)	$Y=\log X/(a\log X+b)$	(8)
$Y=10^{a+bX}$	(9)	$Y=10^{(aX+b)/X}$	(10)
$Y=10^{a+b\log X}=10^a X^b$	(11)	$Y=10^{(a\log X+b)/\log X}$	(12)
$Y=10^{1/(a+bX)}$	(13)	$Y=10^{X/(aX+b)}$	(14)
$Y=10^{1/(a+b\log X)}$	(15)	$Y=10^{1/\log X/(a\log X+b)}$	(16)

求めた。予測の精度は、単相関係数  $r$  によって判定される。

b) 重回帰分析

$p$  個の説明変数  $x_1, x_2, \dots, x_p$  と対応する目的変数の値  $y_1, y_2, \dots, y_n$  が  $n$  組 ( $n \geq p+1$ ) 得られるとき、重回帰分析により次の回帰式が得られる<sup>11), 13)</sup>。

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_p X_p \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$  : 偏回帰係数の最良不偏推定値

また、個々の実測値  $x_{a1}, x_{a2}, \dots, x_{ap}$  ( $a=1, 2, \dots, n$ ) に対して、次式を得る。

$$Y_a = b_0 + b_1 x_{a1} + b_2 x_{a2} + \dots + b_p x_{ap} \dots\dots\dots (18)$$

$$e_a = y_a - Y_a \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 $e_a$  : 残差

予測の精度は、回帰推定値  $Y_a$  と実測値  $y_a$  との単相関係数にあたる重相関係数  $R$  によって判定される。この場合、偏回帰係数の有意性は  $t$  検定され、説明変数としてとり込む (IN) または捨てる (OUT)  $X_1, X_2, \dots, X_p$  は、分散比  $F$  によって判定する。ここでは、 $F_{IN} = F_{OUT} = 2.0$  (変数増減法) を適用した。さらに、 $e_a$  の平均値  $\bar{e}$  および標準偏差  $e_s$ 、 $(y_a/Y_a)$  の平均値  $\bar{y}$  および標準偏差  $z_s$  をそれぞれ求め、 $Y_a$  の  $y_a$  に対するばらつきの程度を検定する。この場合、 $\bar{e}$  が 0 に近く  $e_s$  が小さいほど精度が良いと判定される。

解析にあたっては、特性値の選定条件として、①品質管理しやすいこと、②推定に役立つこと、③他の項目と

の相関がなるべく小さいことに着目し、変数とする項目を次の3ケースに区分して選定した (表一3 参照)。

[ケース1]: 影響要因に考えられる全項目 ( $i=40$ ) の場合で、水セメント比  $W/C$  のように1項目で2変数以上を表わす項目を除いた場合についても対比した。

[ケース2]: 配合要因として関係が強い  $C, W, W_a, W_T, c/v, W_T/C$  とに着目した場合。これらの項目と組み合わせる要因は一定とし、材料条件については骨材の粒度・粒形、材質要因を表わす項目として、細骨材6項目、粗骨材7項目に限定した。

[ケース3]: 推定に役立ちかつ品質管理しやすい項目に限定した場合。項目数を、5~13に限定した。また、推定の適合性を高めるため、データの範囲を限定した場合についても解析した。

3. 調査Iによるコンクリートの圧縮強度と材料・配合・製造条件との関係

(1) 単回帰分析結果

単回帰分析結果から、要因として全項目を選定した分析①の場合を代表例に、 $f'_{c28}$  に対し相関性が強いものから順に列記すると、次のとおりである。

$c/v,$	$(W_T/C),$	$(W/C),$	$C/W_T,$	$C,$	$C/W,$	$C_F,$
92	89	88	87	87	87	62
$C_{c28},$	$(SL),$	$(A),$	$U,$	$(G_{FM}),$	$(G_M),$	$(W_a),$
55	41	39	37	30	28	21
						19
$(S_q),$	$(Q),$	$(G_a),$	$(G_s),$	$(G_T),$	$(G_T),$	$W,$
16	15	15	13	13	11	9
						6
						8

( $n=1207$ )

ここで、( ) 内は負の相関で ( ) なしは正の相関を表わす。下段の数値は、 $Y=a+bX$  式によって求めた場合の単相関係数  $r$  を % で表わしたもので、1% 以下の危険率で有意な項目を示した。

これから、一般には  $f'_{c28}$  との相関が強いのは  $C/W$  であるとされているが、 $c/v$  との相関が最も強く、次に骨材中の吸水量を考慮した  $W_T/C$  となっており、1項目で2変数以上を表わす項目が上位を占めている。1変

表一3 重回帰分析の変数とした項目

区 分	$X_1, X_2, X_3, \dots$	注1)	
I-X1	分析①	$W/C, C/W, c/v, W_T/C, C/W_T, U, C, W, W_a, W_T, SL, A, CO, MT, C_H, C_F, C_{c28}, S_o, 15, S_{FM}, S_A, S_q, S_T, S_H, S_a, S_n, S_u, S_d, G_M, G_{FM},$	
	分析②)	$G_a, G_s, G_T, G_H, G_a, G_n, G_y, G_u, G_n, G_s, Q$	
		( $i=40$ )	
		( $i=31$ )	
I-X2	分析③	$C, W, SL, A, CO, C_H, C_F, C_{c28}, S_{FM}, S_A, S_q, S_T, S_H, S_a, G_M, G_a, G_T, G_n, G_a, G_y, G_n, Q$	
	分析④	$C, SL, A, CO, C_H, C_F, C_{c28}, S_{FM}, S_A, S_q, S_T, S_H, S_a, G_M, G_a, G_T, G_n, G_a, G_y, G_n, Q$	
	分析⑤	$C, W_a, W_T, SL, A, CO, C_H, C_F, C_{c28}, S_{FM}, S_A, S_q, S_T, S_H, S_a, G_M, G_a, G_T, G_n, G_a, G_y, G_n, Q$	
	分析⑥	$c/v, SL, A, CO, C_H, C_F, C_{c28}, S_{FM}, S_A, S_q, S_T, S_H, S_a, G_M, G_a, G_T, G_n, G_a, G_y, G_n, Q$	
	分析⑦	$W_T/C, SL, A, CO, C_H, C_F, C_{c28}, S_{FM}, S_A, S_q, S_T, S_H, S_a, G_M, G_a, G_T, G_n, G_a, G_y, G_n, Q$	
			( $i=22$ )
			( $i=21$ )
I-X3	分析⑧	$C, W, SL, A, CO, C_{c28}, S_T, S_q, G_M, G_a, G_a, G_y$	
	分析⑨L	$\log C, W, SL, A, CO, C_{c28}, S_T, S_a, G_M, G_a, G_a, G_y$	
	分析⑩	$C, SL, A, CO, C_{c28}, S_{FM}, S_A, S_T, S_a, G_M, G_a, G_a, G_y$	
	分析⑪L	$C, W, SL, A, CO, C_{c28}, S_T, S_a, G_M, G_a, G_a$	
	分析⑫L	$\log C, W, SL, A, CO, C_{c28}, S_T, S_a, G_M, G_a, G_a$	
	分析⑬	$C, W, SL, A, CO$	
			( $i=12$ )
		( $i=12$ )	
		( $i=13$ )	
		( $i=11$ )	
		( $i=11$ )	
		( $i=5$ )	

注1) 下線を引いた部分は分析①~⑦の共通項目。( ) 内の  $i$  : 項目数 注2) 調査IIの場合、MTを除く (分析②、 $i=39$ )

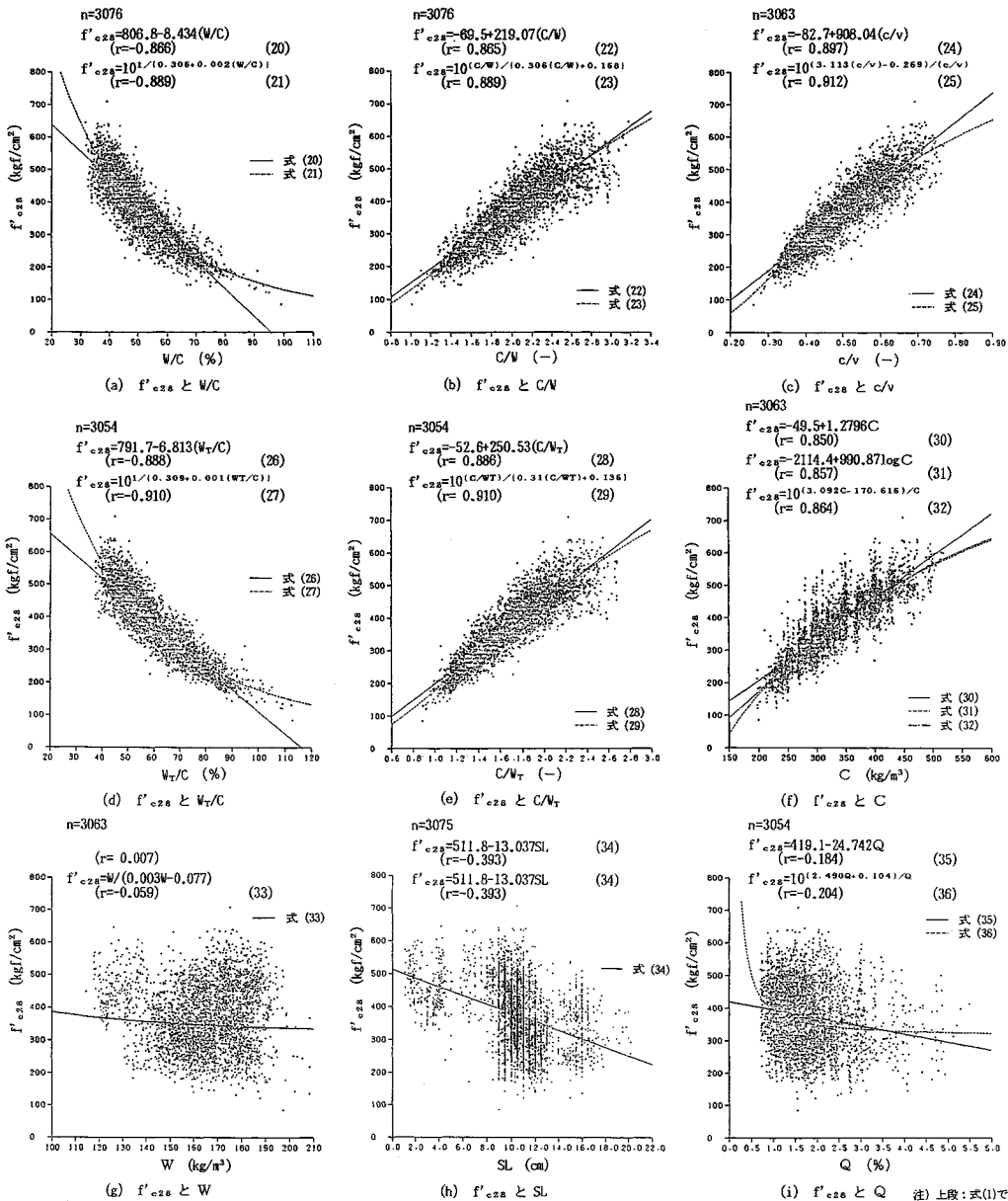


図-1  $f'_{c28}$  と  $W/C$ ,  $C/W$ ,  $c/v$ ,  $W_T/C$ ,  $C/W_T$ ,  $C$ ,  $W$ ,  $SL$ ,  $Q$  との関係 (調査 I)

数の項目としては  $C$  との相関のみが著しく強く、次に、 $C_F$ ,  $C_{c28}$  で表わされるセメントの品質,  $A$ ,  $SL$ ,  $U$ ,  $W$ ,  $CO$  で表わされる配合条件,  $G_{FM}$ ,  $G_M$ ,  $G_G$ ,  $G_T$  で表わされる粗骨材の粒度・粒形要因,  $W_G$ ,  $Q$  で表わされる骨材の材質要因の順である。図-1は、全データに対する  $f'_{c28}$  と  $W/C$ ,  $C/W$ ,  $c/v$ ,  $W_T/C$ ,  $C/W_T$ ,  $C$ ,  $W$ ,  $SL$ ,  $Q$  との関係である。骨材の強度がモルタル強度より大きいとみなされる低強度側ほど  $C$  の影響が強くなる

傾向が認められ、骨材品質等の影響が現われているものと考えられる<sup>14)</sup>。  $f'_{c28}$  と  $C$  との関係式としては、表-2に示した単回帰式のうち、 $r$  が高い順に示すと次のとおりである。

式 (10) : 0.864, 式 (12)・式 (14) : 0.859,  
 式 (4) : 0.858, 式 (3) : 0.857, 式 (2) : 0.855,  
 式 (11) : 0.854, 式 (16) : 0.851, 式 (1) : 0.850  
 品質管理に用いる簡便さからは式 (1) の直線式が用いやすいが、相関性が良い点を考慮すると、直線式に近似

注) 上段: 式(1)で表した場合  
 下段: 式(1)~(16)の16式のうち最も相関が良い式で表した場合

表—4 調査 I の重回帰分析結果 (その 1)

(a) 取り入れられた項目の組と重相関係数、回帰残差の標準偏差

区分	1	2	3	4	5	ス	テ	ッ	プ	9	10	11	12	13	演算結果	
ケ ー ス 1	分析①	c/v, (G <sub>FM</sub> ), (CO), (W <sub>T</sub> /C), (A), (G <sub>T</sub> ), C <sub>G2A</sub> , (SL), (G <sub>A</sub> ), G <sub>0</sub> , (G <sub>0</sub> ), G <sub>A</sub> , S <sub>0.15</sub>														n=1275, i=40, p=25, R=0.863, K=0.927, e <sub>a</sub> =27.1kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.074 式(37)
	分析②	C, (W), (A), (G <sub>FM</sub> ), (G <sub>0</sub> ), C <sub>F</sub> , (G <sub>A</sub> ), (G <sub>A</sub> ), (G <sub>V</sub> ), S <sub>GM</sub> , (G <sub>0</sub> ), (S <sub>0</sub> ), G <sub>A</sub>														n=1300, i=31, p=24, R=0.955, K=0.911, e <sub>a</sub> =30.0kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.083 式(38)
ケ ー ス 2	分析③	C, (W), (A), (G <sub>0</sub> ), (CO), (S <sub>0</sub> ), (G <sub>T</sub> ), C <sub>G2A</sub> , (SL), (G <sub>V</sub> ), G <sub>T</sub> , (G <sub>0</sub> ), Q														n=1775, i=22, p=17, R=0.942, K=0.887, e <sub>a</sub> =33.4kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.090 式(39)
	分析④	C, (SL), (CO), (S <sub>0</sub> ), (A), (G <sub>0</sub> ), (G <sub>V</sub> ), (G <sub>V</sub> ), S <sub>G</sub> , G <sub>M</sub> , (G <sub>0</sub> ), (S <sub>H</sub> ), S <sub>T</sub>														n=1775, i=21, p=15, R=0.925, K=0.855, e <sub>a</sub> =37.7kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.100 式(40)
ケ ー ス 3	分析⑤	C, (W <sub>T</sub> ), (CO), (A), G <sub>T</sub> , Q, (G <sub>V</sub> ), C <sub>G2A</sub> , (SL), (G <sub>0</sub> ), (S <sub>0</sub> ), (W <sub>A</sub> ), (G <sub>0</sub> )														n=1775, i=23, p=17, R=0.942, K=0.888, e <sub>a</sub> =33.2kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.089 式(41)
	分析⑥	c/v, (G <sub>0</sub> ), (CO), (S <sub>0</sub> ), C <sub>G2A</sub> , (SL), (G <sub>V</sub> ), (G <sub>V</sub> ), (G <sub>0</sub> ), G <sub>T</sub> , C <sub>H</sub> , Q, C <sub>F</sub>														n=1775, i=21, p=15, R=0.941, K=0.886, e <sub>a</sub> =33.5kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.090 式(42)
ケ ー ス 3	分析⑦	(W <sub>T</sub> /C), C <sub>G2A</sub> , (CO), (G <sub>T</sub> ), (SL), (A), G <sub>0</sub> , (G <sub>V</sub> ), C <sub>F</sub> , (G <sub>0</sub> ), S <sub>A</sub> , (G <sub>M</sub> ), Q														n=1775, i=21, p=16, R=0.948, K=0.888, e <sub>a</sub> =31.6kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.086 式(43)
	分析⑧	C, (W), (A), (G <sub>0</sub> ), (CO), (S <sub>0</sub> ), (SL), C <sub>G2A</sub> , (G <sub>V</sub> ), (G <sub>M</sub> ), (G <sub>0</sub> ), S <sub>T</sub>														n=1829, i=12, p=12, R=0.936, K=0.877, e <sub>a</sub> =34.9kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.093 式(44)
ケ ー ス 3	分析⑨	log C, (SL), (CO), (S <sub>0</sub> ), (W), (A), C <sub>G2A</sub> , (G <sub>0</sub> ), (G <sub>V</sub> ), (G <sub>0</sub> ), S <sub>T</sub>														n=1829, i=12, p=12, R=0.942, K=0.888, e <sub>a</sub> =33.4kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.088 式(45)
	分析⑩	C, (SL), (CO), (S <sub>0</sub> ), (A), (G <sub>V</sub> ), S <sub>T</sub> , G <sub>M</sub> , (S <sub>A</sub> )														n=1824, i=13, p=9, R=0.917, K=0.842, e <sub>a</sub> =39.6kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.105 式(46)
ケ ー ス 3	分析⑪	C, (W), (A), (CO), (S <sub>0</sub> ), (G <sub>0</sub> ), C <sub>G2A</sub> , (G <sub>0</sub> ), (G <sub>M</sub> ), S <sub>T</sub>														n=2029, i=11, p=11, R=0.933, K=0.871, e <sub>a</sub> =36.2kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.095 式(47)
	分析⑫	log C, (SL), (W), (CO), (S <sub>0</sub> ), C <sub>G2A</sub> , (A), (G <sub>0</sub> ), (G <sub>0</sub> ), S <sub>T</sub> , (G <sub>M</sub> )														n=2029, i=11, p=11, R=0.938, K=0.880, e <sub>a</sub> =34.9kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.091 式(48)
ケ ー ス 3	分析⑬	C, (W), (A), (CO), (S <sub>0</sub> )													n=2104, i=5, p=5, R=0.922, K=0.850, e <sub>a</sub> =38.6kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.102 式(49)	

注) 上段: 項目名 ( )内は負の相関で ( )無しは正の相関 中段: 重相関係数を%で表した値 下段: 回帰残差の標準偏差(kgf/cm<sup>2</sup>)

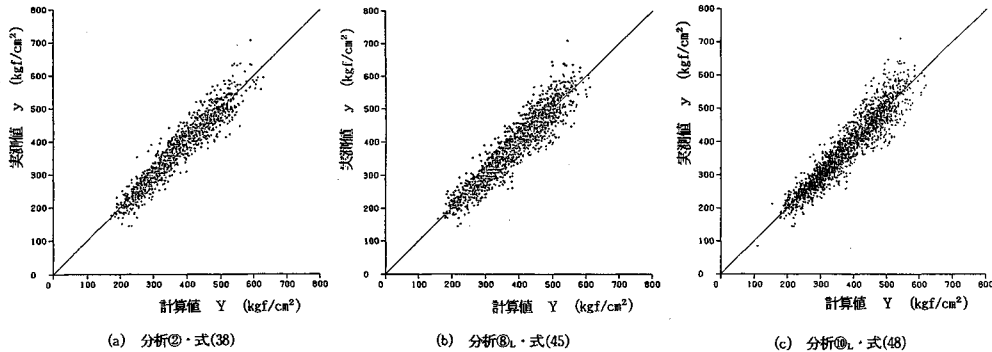
(b) 回帰式

<p>[ケース1]</p> <p>分析①: 式(37)</p> $f'_{c28} = 418.7 + 2153.33(c/v) - 16.19G_{FM} - 2.027CO - 9.582(W_T/C) + 22.00A + 0.2908C_{G2A} - 2.120SL - 1.837G_A - 4.335G_0 - 1.571G_V + 17.15G_A$ <p>(1.84) (7.49) (-3.65) (-6.29) (2.95) (4.52) (-4.39) (-7.13) (-12.35) (-7.30) (5.74)</p> $+ 1.65S_0 + 0.5651C - 380.02(C/W) + 289.90C_H + 19.21S_{GM} - 24.05G_M + 6.174(W/C) + 57.23Q - 1.0902W_T - 3.03S_A + 12.16G_V + 0.01192C_F$ <p>(4.02) (-2.85) (-7.01) (5.27) (4.20) (-4.09) (5.31) (6.35) (-2.80) (-4.35) (3.40) (2.71)</p> $- 192.40G_M - 0.651S_0$ <p>(-11.35) (-1.43)</p> <p>分析②: 式(38)</p> $f'_{c28} = 6969.3 + 1.2570C - 2.8432W - 33.86A - 25.03G_{FM} - 49.641G_0 + 0.00785C_F - 1.567G_0 - 1170.04G_M - 0.478G_V + 33.04S_{GM} - 1.358G_P$ <p>(6.75) (67.55) (-31.20) (-17.93) (-5.36) (-5.01) (2.17) (-5.45) (-5.30) (-2.55) (6.12) (-5.70)</p> $+ 10.99G_A + 0.3622C_{G2A} + 4.71S_{GM} + 2.30S_0 + 15 - 1180.09S_H + 1716.27G_T + 41.28Q - 1.482S_0 - 41.79S_G - 1.98S_H + 1605.97S_T - 13.43G_V$ <p>(3.61) (5.89) (3.22) (4.96) (-5.84) (4.50) (4.00) (-2.72) (-5.55) (-2.46) (5.37) (-1.89)</p> $- 0.530CO$ <p>(-1.76)</p>
<p>[ケース2]</p> <p>分析③: 式(39)</p> $f'_{c28} = 3636.0 + 1.2435C - 2.2059W - 23.20A - 47.974G_0 - 2.747CO - 25.96G_0 - 0.9116G_V + 0.1590C_{G2A} - 1.914SL - 1094.40G_M + 1695.65G_T$ <p>(6.68) (74.84) (-23.47) (-13.73) (-5.18) (-12.79) (-6.34) (-5.41) (3.89) (-5.28) (-5.27) (4.76)</p> $- 0.843G_0 + 38.28Q + 0.01163C_F + 3.17S_A - 0.484G_M - 39.27S_H$ <p>(-5.03) (3.95) (4.05) (4.05) (-3.10) (-1.72)</p> <p>分析④: 式(40)</p> $f'_{c28} = 6149.3 + 1.1863C - 6.220SL - 3.763CO + 40.32S_A - 16.03A - 1.227G_0 - 124.79G_M - 1.054G_V - 88.024S_0 + 0.738G_P - 1.123G_G$ <p>(5.87) (78.13) (-16.01) (-16.31) (4.01) (-8.78) (-6.69) (-9.32) (-5.69) (-5.37) (4.73) (-3.16)</p> $- 2317.05S_H + 3580.51S_T + 57.52C_H - 1.61S_A$ <p>(-5.63) (5.50) (2.17) (-1.72)</p> <p>分析⑤: 式(41)</p> $f'_{c28} = 3308.6 + 1.1384C - 2.5043W_T - 2.705CO - 26.25A + 1556.95G_T + 153.97Q - 0.952G_V + 0.1805C_{G2A} - 1.948SL - 0.808G_0 - 24.00S_G$ <p>(6.17) (45.23) (-23.30) (-12.75) (-15.02) (4.40) (6.62) (-5.70) (4.20) (-5.43) (-4.88) (-6.14)</p> $- 4.629G_A + 2.81S_A + 0.0108C_F - 0.499G_M - 44.343G_0 - 970.12S_H$ <p>(-3.73) (4.14) (3.79) (-3.26) (-4.82) (-4.69)</p>

表—4 調査Iの重回帰分析結果(その2)

分析②：式(42)	
$f'_{c2s}$	$= 2015.0 + 820.59(c/v) - 37.946G_s - 2.894C_0 - 21.62S_0 + 0.2119C_{c2s} - 1.852SL - 0.985G_y - 883.64G_r - 0.898G_p + 1321.42G_r + 145.75C_m$ (3.67) (73.26) (-4.13) (-13.64) (-5.52) (4.54) (-4.85) (-5.89) (-4.28) (-5.40) (3.73) (4.54)
	$+ 28.82Q + 0.01320C_r + 1.96S_s - 0.406G_s$ (3.00) (3.54) (2.90) (-2.80)
分析③：式(43)	
$f'_{c2s}$	$= 3271.5 - 6.387(W_r/C) + 0.2432C_{c2s} - 2.842C_0 + 1336.60G_r - 3.361SL - 20.24A - 19.56G_0 - 0.9016G_y + 0.01694C_r - 0.673G_p + 2.49S_0$ (5.41) (-78.41) (6.05) (-14.14) (3.36) (-11.45) (-12.96) (-1.57) (-5.67) (6.58) (-4.27) (3.89)
	$- 0.344G_m + 93.33Q - 34.49S_0 - 876.82G_m - 38.228G_0$ (-2.50) (5.32) (-4.99) (-3.77) (-3.69)
[ケース3]	
分析④：式(44)	
$f'_{c2s}$	$= 557.8 + 1.2645C - 2.1263W - 22.63A - 2.881G_0 - 2.074C_0 - 8.50S_0 - 2.374SL + 0.2410C_{c2s} - 0.914G_y - 0.760G_m - 3.53G_p$ (15.91) (79.54) (-22.81) (-13.36) (-9.11) (-9.86) (-6.98) (-6.57) (6.68) (-5.62) (-5.13) (-3.28)
	$+ 25.33S_r$ (2.00)
分析⑤ <sub>L</sub> ：式(45)	
$f'_{c2s}$	$= -1543.6 + 963.081 \log C - 3.144SL - 2.249C_0 - 9.04S_0 - 1.8916W - 21.03A + 0.3138C_{c2s} - 2.527G_0 - 0.929G_y - 0.4916G_m - 3.27G_p$ (-38.32) (84.29) (-9.20) (-11.19) (-7.77) (-21.37) (-12.99) (9.19) (-8.38) (-5.98) (-3.46) (-3.18)
	$+ 30.45S_r$ (2.52)
分析⑥：式(46)	
$f'_{c2s}$	$= 91.0 + 1.1901C - 6.951SL - 3.041C_0 - 8.79S_0 - 13.42A - 0.845G_y + 64.96S_r + 0.273G_m - 1.67S_0$ (3.20) (75.94) (-20.71) (-13.14) (-6.61) (-13.42) (-7.36) (-4.86) (4.11) (1.88)
分析⑦：式(47)	
$f'_{c2s}$	$= 473.9 + 1.2980C - 2.0718W - 18.11A - 2.404C_0 - 2.986SL - 7.40S_0 - 2.640G_0 + 0.2561C_{c2s} - 5.26G_0 - 0.461G_m + 40.50S_r$ (13.69) (82.52) (-22.51) (-11.22) (-11.76) (-8.39) (-6.39) (-8.45) (7.25) (-5.21) (-3.35) (3.28)
分析⑧ <sub>L</sub> ：式(48)	
$f'_{c2s}$	$= -1680.6 + 985.621 \log C - 3.753SL - 1.8306W - 2.496C_0 - 8.15S_0 + 0.3396C_{c2s} - 16.31A - 2.253G_0 - 4.86G_0 + 45.33S_r - 0.209G_p$ (-42.36) (88.31) (-11.02) (-20.82) (-12.65) (-7.29) (10.07) (-10.46) (-7.49) (-4.99) (3.80) (-1.57)
分析⑨：式(49)	
$f'_{c2s}$	$= 352.8 + 1.3284C - 1.3729W - 20.89A - 2.869C_0 - 3.627SL$ (26.22) (89.82) (-19.94) (-12.77) (-13.99) (-9.95)

注 下段の()内はt値



図—2 計算値と実測値との関係

した関係式である式 (3) の対数関数式が単回帰式に最適であると判断される (図—1(f) の式 (31) 参照)。

(2) 重回帰分析結果

重回帰分析結果は、表—4 および図—2 に示すとおりであり、変数を取り入れられる、または取り除かれるステップごとに重相関係数  $R$ 、偏回帰係数  $b_i$  の正負および回帰残差  $e$  の標準偏差  $e_s$  を、次の例のように示した。

分析①の場合

1	2
$c/v$ : ステップ1で $c/v$ ( $G_{FM}$ )	: ステップ2で $G_{FM}$
92	93
40	37
が取り入れられ	そ
の $b_i$ は + であり、	の $b_i$ は - であり、
$R = 0.92, e_s = 40$	$R = 0.93, e_s = 37$

kgf/cm<sup>2</sup> である

kgf/cm<sup>2</sup> である

ここでは、ステップ数13までを示し以下は省略したが、最終的に  $F_{1W} = F_{0ur} = 2.0$  で終了した全変数  $i$  の自由度  $p$ 、重相関係数  $R$ 、寄与率  $K$ 、回帰残差  $e$  の標準偏差  $e_s$  および(実測値  $y$ /計算値  $Y$ )の標準偏差  $e_s$  を、演算結果として回帰式とともにそれぞれ示した。

表—4 から、圧縮強度  $f'_{c2s}$  は、管理項目を1項目とする場合(各分析のステップ1)には、単回帰分析結果で述べたように、 $c/v$  との相関が最も強く、 $R$  および  $e_s$  がそれぞれ 0.91~0.92、40~42 kgf/cm<sup>2</sup> である。また、1項目で2変数以上を表わす項目を除いた場合には、 $C$  との相関がきわめて強く、それぞれ 0.86~0.87、49~51 kgf/cm<sup>2</sup> である。変数の項目数が10程度以上であ

表—5 調査Ⅰの重回帰分析結果 ( $f'_{c28}=180\sim600 \text{ kgf/cm}^2$ )

分析⑧ $f'_{c28} = -1591.0 + 945.51 \log C - 2.052CO - 1.7545W - 9.21S_a + 0.4004C_{c28} - 18.10A - 2.497G_a - 0.910G_v - 0.665G_w - 1.586SL + 28.76S_T$ (-40.45) (74.42) (-9.80) (-20.39) (-8.02) (9.52) (-11.12) (-8.38) (-6.03) (-4.63) (-3.54) (2.35) -2.08G <sub>a</sub> (-2.11) (n=1670, i=12, p=12, R=0.947, K=0.886, e <sub>a</sub> =31.2kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>a</sub> =0.084) 式(50)
分析⑨ $f'_{c28} = -1916.6 + 904.22 \log C - 3.065CO - 8.27S_a - 4.247SL - 10.26A - 0.785G_v + 0.1984C_{c28} + 69.48S_T - 2.31S_a$ (-48.51) (67.89) (-13.89) (-6.69) (-9.17) (-5.91) (-4.96) (4.36) (4.72) (-2.74) (n=1667, i=13, p=9, R=0.933, K=0.870, e <sub>a</sub> =34.9kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>a</sub> =0.093) 式(51)
分析⑩ $f'_{c28} = -1703.0 + 963.25 \log C - 1.993CO - 1.7076W + 0.412C_{c28} - 8.75S_a - 14.85A - 2.274G_a - 2.344SL + 43.83S_T - 3.63G_a - 0.374G$ (-44.11) (76.60) (-9.60) (-19.96) (10.00) (-8.03) (-9.64) (-7.74) (-5.34) (3.70) (-3.93) (-2.83) (n=1838, i=11, p=11, R=0.943, K=0.888, e <sub>a</sub> =32.3kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>a</sub> =0.086) 式(52)

れば、これらのいずれの場合も推定精度が同程度であり、しかも項目数を多くしても精度の向上が少なくなっている。

すなわち、圧縮強度に対しては、C、W、Aの3項目が占める寄与率が  $(0.91\sim0.92)^2 = 83\sim85\%$  であり、このほかの項目の占める割合が10%弱である。そこで、C・W・Aの3変数の重回帰式で表わす場合とこれをc/vの1変数で表わす場合とを比べると、相関係数および標準偏差が同じで精度の差は認められない。品質管理の容易さを考慮すると、1項目で2変数以上を表わす項目を除いた推定式の方が合理的である。

分析④と⑨から、Wを除外すると配合設計条件のうち影響が大きい順はC、(SL)、(CO)、(S<sub>a</sub>)、(A)となっており、 $f'_{c28}$ に対しては粗骨材よりも細骨材の影響の方が大きいことが示されている。分析⑧と⑩では、選定した全項目が変数に取り込まれており、各変数は今までの試験結果ともその傾向が合っている<sup>15)など</sup>。Cは、対数関数値を変数とした⑧<sub>L</sub>、⑩<sub>L</sub>の方が、それぞれ⑧、⑩より相関性が良くなっている。

また、図—2から、計算値と実測値との関係は $f'_{c28}$ が大きい領域でばらつきがやや大きくなっているが、全体的には等分散性の仮定に合っており、要因間の相関が小さく多重共線性の問題も生じておらず、推定式として採用できるものとみなされる。

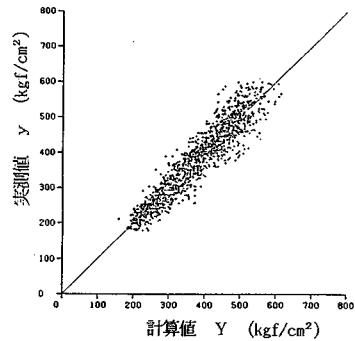
(3) 圧縮強度の品質管理のための推定式

以上のことから、 $f'_{c28}$ の推定式としては、品質管理を行う範囲がほぼ $f'_{c28}=180\sim600 \text{ kgf/cm}^2$ 、SL=5~18 cm、CO=5~35°CのAEコンクリート(A=2~7%)であること、また、 $f'_{c28}$ はCとは対数関数値の方が相関性が良いことを考慮して、これらの条件で分析⑧<sub>L</sub>~⑩<sub>L</sub>を行った結果は、表—5および図—3に示すとおりである。

4. 調査Ⅱによるコンクリートの圧縮強度と材料、配合、製造条件との関係

(1) 単回帰分析および重回帰分析結果

全項目数は、調査Ⅰ結果の40からMTを除いた39



図—3 計算値と実測値との関係、分析⑩<sub>L</sub>・式(52) ( $f'_{c28}=180\sim600 \text{ kgf/cm}^2$ )

であり、同様に解析を行った結果から、分析①<sub>2</sub>の場合を代表例に $f'_{c28}$ に対し相関が強い項目を順に列記すると、次のとおりである。

$$\begin{matrix}
 c/v, & C/W, & C/W, & C, & (W/C), & (W_T/C), & C_{c28}, \\
 89, & 88, & 87, & 87, & 86, & 84, & 66, \\
 C_F, & (G_M), & (G_{FM}), & (A), & W, & U, & (W_a), & S_H, & C_H, & S_T, \\
 55, & 38, & 31, & 17, & 17, & 16, & 15, & 13, & 11, & 11 \\
 (Q), & (S_a), & S_c & & & & & & & \\
 9, & 8, & 7 & & & & & & & \\
 & & & & & & & & & (n=1395)
 \end{matrix}$$

これらから、 $f'_{c28}$ は調査Ⅰの解析結果と同様に、c/vとの相関が最も強く $r=0.885$ に達している。1変数の項目としてはCとの相関が最も強く $r=0.866$ であり、次に $C_{c28}$ 、 $C_F$ 、 $C_H$ で表わされるセメントの品質、 $G_M$ 、 $G_{FM}$ で表わされる粗骨材の粒度・粒形要因、A、W、Uで表わされる配合条件、 $W_a$ 、Qで表わされる骨材の材質要因、 $S_H$ 、 $S_T$ 、(S<sub>a</sub>)、S<sub>c</sub>で表わされる細骨材の粒度・粒形・材質要因の順である。

また、全データの単回帰分析結果を図—4に示す。低品質骨材の試験値を多く含む図—1と比較して、規格値内に入るように骨材が選定されているため(両図の(i)参照)、骨材品質の影響が小さく、高強度側でのばらつきも低強度側に比べやや大きい程度であり、 $f'_{c28}$ のばらつきが全体的に狭くなっている。

重回帰分析結果から、調査Ⅰの解析結果と異なる傾向は、Aが変数に取り込まれていない点と、逆にS<sub>T</sub>がステップ4~5で取り込まれている点である。この理由は、調査Ⅰの解析結果と比べて、空気量の変域が $4\pm1\%$ で

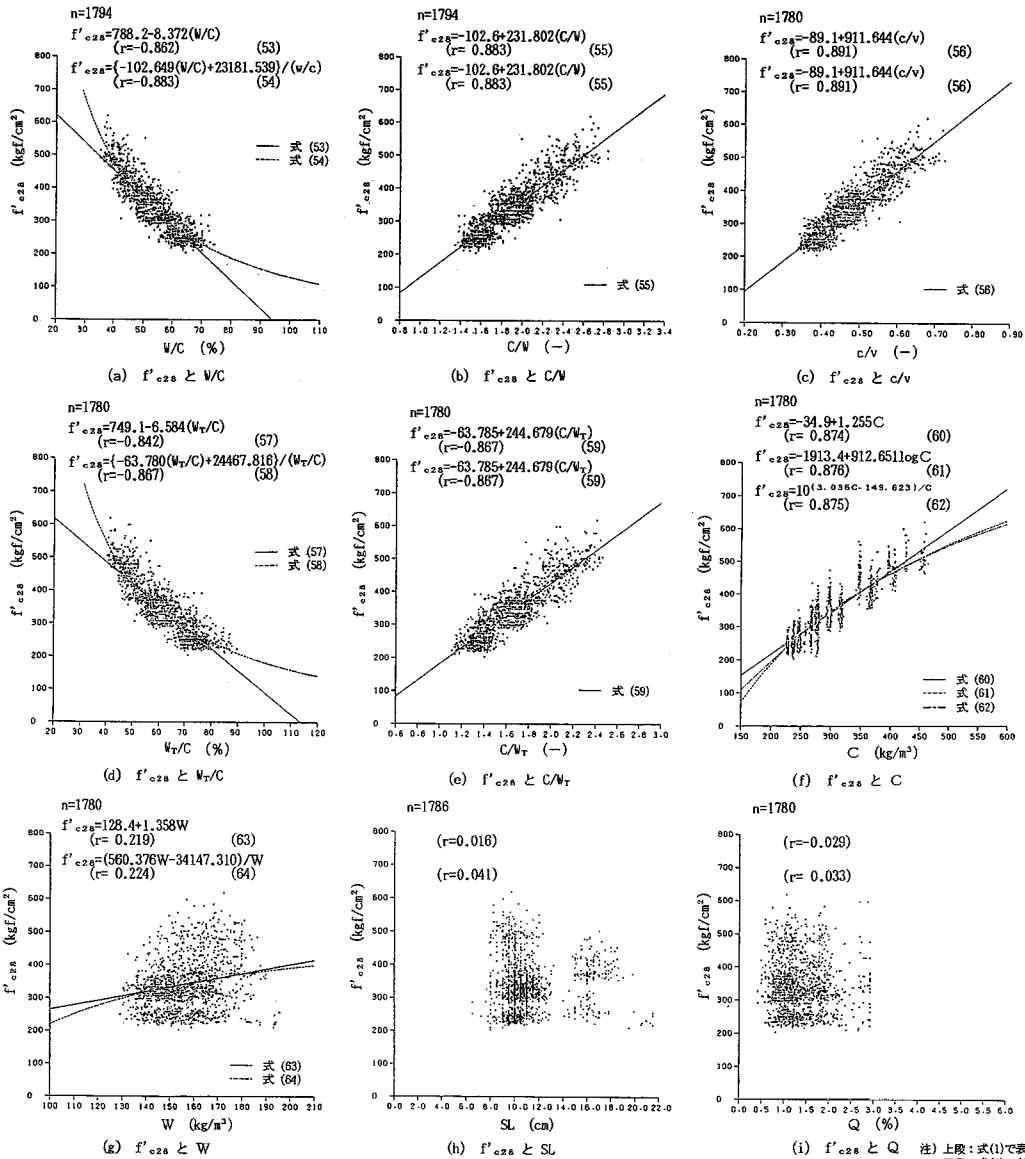


図-4  $f'_{c28}$  と  $W/C$ ,  $C/W$ ,  $c/v$ ,  $W_T/C$ ,  $C/W_T$ ,  $C$ ,  $W$ ,  $SL$ ,  $Q$  との関係 (調査 II)

小さいこと、 $S_Q$ が最大値3.71で変域が小さいのに対し、規定値がない  $S_T$ は1.485~1.886 kg/lで同程度で広いことによると考えられる。すなわち、現実に製造されているコンクリートに対しては、 $f'_{c28}$ に対し  $C$ ,  $W$ ,  $C_{28}$ ,  $CO$ ,  $S_T$ の5項目が占める寄与率が(0.91~0.92)<sup>2</sup>≒83~85%であり、このほかの項目の占める割合が2~3%程度で小さい。

さらに、 $W$ を除いた分析④と⑨とから、配合設計条件のうち影響が大きい順は  $C$ ,  $S_T$ ,  $C_{28}$ , ( $CO$ ), ( $SL$ )となっており、 $W$ に対しては、 $G_G$ ,  $G_M$ のように粗骨材の影響が大きい、 $f'_{c28}$ に対しては、細骨材の

影響の方が大きいことが示されている<sup>11)</sup>。分析⑧と⑩では、選定した項目のうち  $A$ 以外の全項目が取り込まれており、今までの試験結果ともその傾向が合っている。

推定精度を  $e_s$  でみると、1変数の項目の場合、5変数で約30 kgf/cm<sup>2</sup>、10変数で28~29 kgf/cm<sup>2</sup>程度であり、21変数で26.6 kgf/cm<sup>2</sup> (分析⑩<sub>2</sub>)となっている。いずれの分析も等分散性の仮定にほぼ合っており、各要因間の相関が小さく推定式として使用できるとみなされる。

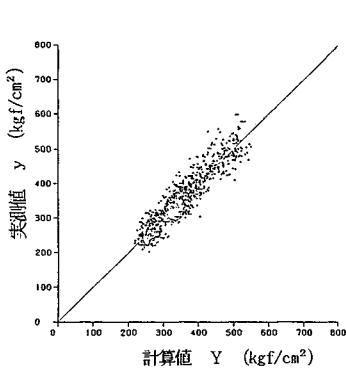
(2) 圧縮強度の品質管理のための推定式

以上のことから、調査 I と同様に、 $f'_{c28}$ =180~600

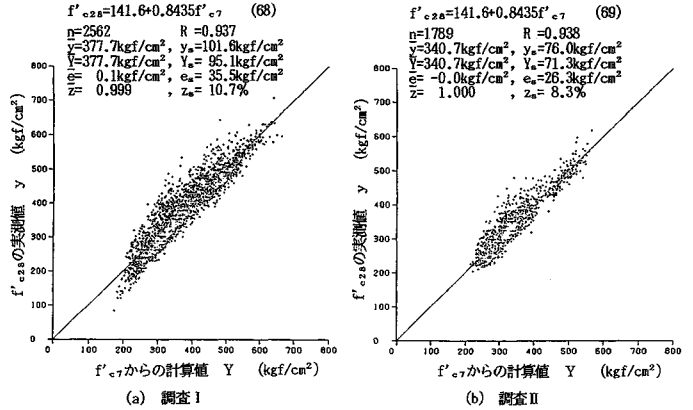


表一六 調査Ⅱの重回帰分析結果 ( $f_{c28}=180\sim600\text{ kgf/cm}^2$ )

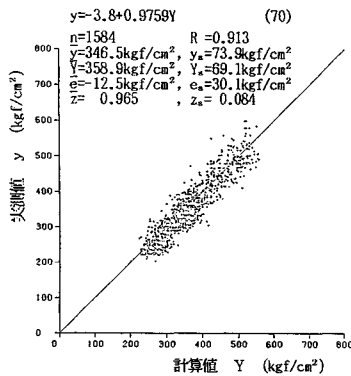
分析⑧ <sub>L</sub> $f'_{c28} = -2070.9 + 914.71\log C - 1.1144W + 0.5947C_{c28} + 139.83S_T - 1.56200 - 1.5496G - 1.751SL - 4.636G_0 - 1.782G_T$ (-54.79) (60.49) (-12.36) (14.30) (12.11) (-10.12) (-4.52) (-4.37) (-3.67) (-3.07) (n=1545, i=12, p= 9, R=0.925, K=0.856, e <sub>s</sub> =28.0kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.081) 式(65)
分析⑨ <sub>L</sub> $f'_{c28} = -2278.2 + 875.69\log C + 0.5634C_{c28} + 191.38S_T - 1.54200 - 3.063SL + 0.451G_M - 4.92G_0 - 14.28S_{TM}$ (-56.36) (53.94) (13.17) (18.17) (-9.59) (-7.54) (4.05) (-3.68) (-2.31) (n=1535, i=13, p= 8, R=0.919, K=0.845, e <sub>s</sub> =29.2kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.083) 式(66)
分析⑩ <sub>L</sub> $f'_{c28} = -2041.0 + 917.86\log C - 1.1589W + 0.5896C_{c28} + 130.76S_T - 1.57600 - 1.7796G - 1.931SL - 5.08G_0$ (-54.34) (61.73) (-13.27) (14.25) (12.03) (-10.25) (-5.33) (-4.87) (-4.05) (n=1581, i=11, p= 8, R=0.924, K=0.853, e <sub>s</sub> =28.2kgf/cm <sup>2</sup> , z <sub>s</sub> =0.081) 式(67)



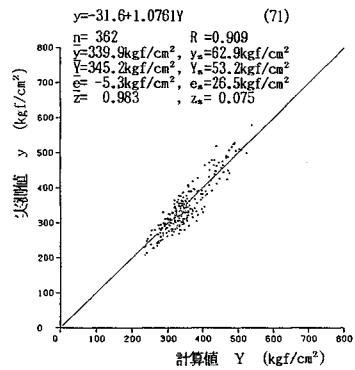
図一五 計算値と実測値との関係, 分析⑩<sub>L</sub>・式(67) ( $f_{c28}=180\sim600\text{ kgf/cm}^2$ )



図一六  $f_{c28}$ と $f_{c7}$ との関係



図一七 式(52)の調査Ⅱ(昭和57・58年度竣工)データへの適用計算結果



図一八 式(67)の調査Ⅱ(昭和53年度竣工)データへの適用計算結果

kgf/cm<sup>2</sup>, SL=5~18cm, CO=5~35°CのAEコンクリート(3~6%)に限定して分析⑧<sub>L</sub>~⑩<sub>L</sub>を行った結果を, 表一六および図一五にそれぞれ示す(ただし, 本調査では  $f_{c28}=203\sim598\text{ kgf/cm}^2$ , A=3.2~5.8%)。

5. 推定式の検証

材料条件および配合条件からコンクリートの圧縮強度を推定する方法として, 多数の関係式を得たが, これらの中から推定式を選定するにあたっては, できるだけ

少ない項目で精度良く推定計算できることが望ましい。

推定精度としては, 既往の早期強度判定法の精度が目安となり, 28日強度推定結果の標準偏差が25~30 kgf/cm<sup>2</sup>(強度比で7~13%)程度<sup>(16), (17)</sup>などであることが報告されている。また, 7日強度から28日強度を推定する方法の場合, 15.6~30.6 kgf/cm<sup>2</sup>程度であり, 本調査では35.5 kgf/cm<sup>2</sup>, 26.3 kgf/cm<sup>2</sup>である(図一六参照)。以上のことから, 圧縮強度の推定精度としては, e<sub>s</sub>=30 kgf/cm<sup>2</sup>, z<sub>s</sub>=10%程度以内が限度であると考え

えられる。

そこで、式 (52) および式 (67) を代表例に、それぞれ調査Ⅱデータに適用して圧縮強度の推定計算を行うと、図一7および8に示すとおりであり、推定値  $Y$  は実測値  $y$  に対してほぼ原式と同じ精度を満足しており普遍性があるものとみなされ、品質管理に用いる推定式として実用可能なことが検証された。

## 6. 結 論

本研究により得られた結果をまとめると、次のとおりである。

(1) コンクリートの品質管理 (配合設計) において、圧縮強度  $f'_{c28}$  (kgf/cm<sup>2</sup>, 材令 28 日) の説明変数として、相関が良い項目は、次に示すとおりである。

$$c/v, C/W, C/W_T, (W/C), (W_T/C), C, (W), (W_T), C_{c28}, S_T, (SL), (A), (CO), (G_Q), (G_M), (G_Q), (G_V), (S_Q)$$

管理項目を 1 項目とする場合には、1 項目で 2 変数以上を表わす項目との相関が強く、いずれの調査結果もセメント空隙比  $c/v$  との相関が最も強い。1 変数の項目としては、単位セメント量  $C$  との相関がきわめて強く、土木用の一般的なコンクリート ( $f'_{c28} = 180 \sim 600$  kgf/cm<sup>2</sup> 程度) の強度推定には、 $\log C$  との関係を用いるのが最適である。

(2) 圧縮強度の推定方法として、多変数一次式で表わす重回帰式 (18) は、簡便でかつ精度が良い関係式として実用できる。精度を向上させるには、説明変数として (1) の項目の中から変域の大きい項目を採用すれば良い。

土木用の一般的なコンクリート ( $f'_{c28} = 180 \sim 600$  kgf/cm<sup>2</sup>,  $W/C = 30 \sim 80\%$ ,  $SL = 5 \sim 18$  cm,  $A = 3.0 \sim 6.0\%$ ,  $G_M = 20 \cdot 25$  および 40 mm) の品質推定を配合設計時に行う場合の管理項目としては分析⑩で選定した次の 11 項目が最適であり、推定式の代表例として式 (52) および (67) を示した。

$$\log C, W, SL, A, CO, C_{c28}, S_T, S_Q, G_M, G_Q$$

なお、本論文は、著者が昭和 63 年 6 月付で東京大学より工学博士の学位を受けた学位論文<sup>18)</sup>の内容の一部である。

謝 辞：本研究にあたり、東京大学 小林一輔名誉教授のご親切なるご指導を賜りました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。また、公団本社技術部、試験所、全国 10 建設局試験課の方々の多大なるご協力を頂きま

した。ここに、慎んで厚くお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) コンクリートの品質管理編集委員会：コンクリートの品質管理，日本規格協会，1984 年 10 月。
- 2) 豊福俊泰：荷おろし箇所即座に品質判定が不可欠＝発注者の立場から＝，月刊生コンクリート，Vol. 7, No. 11, pp. 23～26, 1988 年 11 月。
- 3) Abrams, D. A. : Design of concrete mixture, Structural Materials Research Lab., Lewis Institute, Bul. 1, Chicago, 1918.
- 4) Talbot, A. N. : A proposed method of estimating the density and strength of concrete and of proportioning the materials by the experimental and analytical consideration of voids in mortar and concrete, Proc. ASTM, 1921.
- 5) Lyse, I. : Tests on consistency and strength of concrete having constant water concrete, Proc. ASTM, Vol. 32, Part II, 1925.
- 6) 小阪義夫：コンクリートと力 (2), コンクリート工学, Vol. 17, No. 5, pp. 56～62, 1979 年 5 月。
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書・施工編, 1985 年 10 月。
- 8) 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 85 号, pp. 15～44, 1962 年 9 月。
- 9) 神田 衛：コンクリート強度の早期判定に関する一研究, 土木学会論文報告集, 第 209 号, pp. 123～130, 1973 年 1 月。
- 10) 穂積 豊：まだ固まらないコンクリートの性質を用いて圧縮強度を推定する方法について, 土木技術, 第 14 巻, 第 7 号, pp. 4～16, 1959 年 7 月。
- 11) 豊福俊泰・中村修吾・鬼丸良雄：重回帰分析によるコンクリートの品質管理システムに関する研究, 土木学会論文集, 第 366 号/V-4, pp. 153～162, 1986 年 2 月。
- 12) 豊福俊泰：データ解析によるコンクリートの品質変化とその要因に関する研究, 土木学会論文集, 第 408 号/V-11, pp. 147～156, 1989 年 8 月。
- 13) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正：多変量解析法 (改訂版), 日本科学技術連盟, 1981 年。
- 14) 岩崎訓明：コンクリートの特性, 共立出版, pp. 81～84, 1975 年 12 月。
- 15) 飯岡 豊・豊福俊泰：コンクリートの強度および耐久性におよぼす骨材粒の特質, セメント技術年報 31, pp. 191～195, 1977 年 12 月。
- 16) 池田尚治・十代田知三：コンクリート品質の早期判定セミナーの概況, コンクリート工学, Vol. 23, No. 12, pp. 74～83, 1985 年 12 月。
- 17) 土木学会：コンクリートの品質管理試験方法, コンクリートライブラリー, 第 38 号, 1974 年 9 月。
- 18) 豊福：データ解析によるコンクリートの品質管理システムに関する研究, 東京大学学位論文, 1988 年 1 月。

(1989. 10. 9・受付)